

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет біотехнології і біотехніки**

**Кафедра екобіотехнології та біоенергетики**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Євгеній КУЗЬМІНСЬКИЙ  
(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Екологічна біотехнологія та біоенергетика»**

**спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія»**

**на тему: «Технологія виробництва біогазу з відходів тваринництва та рослинництва»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи БЕ-61

Веремчук Тетяна Віталіївна \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н., доцент

Щурська Катерина Олександрівна \_\_\_\_\_

Консультант з проектування:

Проф., д.т.н, проф.,

Саблій Лариса Андріївна \_\_\_\_\_

Рецензент:

д.б.н., професор

Горчаков Володимир Юрійович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному  
проєкті немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Пояснювальна записка	58	
3	A1	ЕКБ.БЕ6103.ТС	Технологічна схема	1	
4	A1	ЕКБ.БЕ6103.АС	Апаратурна схема	1	
5	A1	ЕКБ.БЕ6103.ДП	Метантенк	1	

				ЕКБ.БЕ6103.ДП		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Веремчук Т.В.				1	1
Керівн.	Щурська К.О.				КПІ ім. Ігоря Сікорського КЕБ Гр. БЕ-61	
Консульт.	Саблій Л.А.					
Н/контр.						
Зав.каф.	Кузьмінський Є.В.					

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет біотехнології і біотехніки  
Кафедра екобіотехнології та біоенергетики

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Освітньо-професійна програма «Екологічна біотехнологія та біоенергетика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Євгеній КУЗЬМІНСЬКИЙ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

«\_\_»\_\_\_\_\_ 2020р.

**ЗАВДАННЯ  
на дипломний проєкт студенту  
Веремчук Тетяні Віталіївні**

1. Тема проєкту «Технологія виробництва біогазу з відходів тваринництва та рослинництва»

керівник проєкту к.т.н., доцент Щурська Катерина Олександрівна,  
затверджені наказом по університету від «\_\_»\_\_\_\_\_ 20\_\_ р. №\_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом проєкту \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проєкту: поголів'я ВРХ –300 голів; ко-субстрат – силос кукурудзи; необхідна вологість для зброджування – 90%. Режим зброджування – безперервний. Спроекувати метантенк для зброджування гною ВРХ та силосу кукурудзи.

4. Зміст пояснювальної записки: характеристика сировини, кінцевого продукту; обґрунтування вибору технології; біохімічні основи технологічного процесу, характеристика біологічних агентів; опис технологічного процесу, матбаланс, контроль виробництва; основні технологічні розрахунки, вибір обладнання; техніка безпеки, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Технологічна схема

виробництва біогазу (А1); Апаратурна схема виробництва біогазу (А1);  
Креслення метантенка для виробництва біогазу (А1).

6. Консультанти розділів проекту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічна частина дипломного проекту	д.т.н., проф. Саблій Л.А.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

Студент \_\_\_\_\_ Веремчук Тетяна  
(підпис)

Керівник проекту \_\_\_\_\_ Щурська Катерина  
(підпис)

\_\_\_\_\_

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 60 с., 7 рис., 10 табл., 26 посилань.

У дипломному проекті наведено характеристику гною ВРХ та силосу кукурудзи як сировини для отримання біогазу. Проаналізовано технології виробництва біогазу та обрано одноступінчастий безперервний режим зброджування в мезофільних умовах. Описано біохімічні основи процесу та біологічні агенти (гідролітичні, ацидогенні, ацетогенні, метаногенні бактерії).

Представлено та описано технологію виробництва біогазу з відходів ВРХ та силосу кукурудзи, розроблено технологічну та апаратурну схеми. Розраховано вихід біогазу, матеріальний баланс, основні параметри процесу. Обрано споруду для виробництва біогазу – метантенк об'ємом 1000 м<sup>3</sup>.

ВИРОБНИЦТВО БІОГАЗУ, ГНІЙ ВРХ, СИЛОС КУКУРУДЗИ,  
АНАЕРОБНЕ ЗБРОДЖУВАННЯ, МЕТАНТЕНК.

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 60 p., 7 figs., 10 tables, 26 references.

The diploma project presents the characteristics of cattle manure and maize straw as a substrate of biogas production. Biogas production technologies were analyzed and a one-stage continuous anaerobic digestion in mesophilic conditions was selected. The biochemical bases of the process and biological agents (hydrolytic, acidogenic, acetogenic, methanogenic bacteria) were described.

The technology of biogas production from cattle manure and maize straw was presented and described, technological and hardware schemes were created. Biogas yield, material balance, basic process parameters are calculated. A facility for biogas production - a methane tank with a capacity of 1000 m<sup>3</sup> - was selected.

**BIOGAS PRODUCTION, CATTLE MANURE, MAIZE STRAW,  
ANAEROBIC DIGESTION, METHANE TANK.**

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, КІНЦЕВОГО ПРОДУКТУ. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ .....	8
1.1 Характеристика сировини .....	8
1.2 Обґрунтування вибору технології .....	13
1.3 Характеристика та використання біогазу .....	22
РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНИХ АГЕНТІВ .....	28
2.1. Схема перебігу процесів.....	28
2.2 Характеристика мікроорганізмів, що беруть участь в анаеробному зброджуванні .....	30
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	35
3.1 Опис технологічного процесу.....	35
3.2 Сировина та матеріали.....	37
3.3. Матеріальний баланс .....	38
3.4 Контроль виробництва .....	39
РОЗДІЛ 4. ВИБІР І ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ.....	42
4.1 Основні технологічні розрахунки .....	42
4.2 Підігрів сировини в метантенку .....	47
4.3 Перемішування сировини в метантенку.....	48
РОЗДІЛ 5.ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ, ОХОРОНА ПРАЦІ.....	51
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис		ЗМІСТ		
Розроб.		Веремчук Т.В.				Арк.	Аркушів
Перевір.		Щурська К.О.				7	
Затверд.		Щурська К.О.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	

## ВСТУП

Одним з найбільш перспективних альтернативних джерел енергії є біогаз. Біогаз - це суміш газів, який отримують в результаті анаеробного зброджування органічної маси (субстрату). Частка метану в біогазі може досягати 70%. Він може бути використаний декількома способами. Біогаз можна спалювати в опалювальних установках і отримувати тепло для обігріву. У збагаченому вигляді його застосовують в автомобільних двигунах в якості палива. У когенераційних установках можна отримувати електроенергію, яку потім продають або використовують у власних виробництвах.

Актуальність використання нетрадиційних джерел енергії, зокрема біогазу, полягає в наступних причинах:

1. З розвитком економіки країни зростає споживання енергії у всіх видах (електричної, теплової, паливної). Промислове виробництво, ТЕС, робота двигунів внутрішнього згорання - всі вони потребують постійного притоку енергії того чи іншого виду. При цьому основний спосіб отримання енергії - це спалювання викопних джерел - вугілля, природного газу; бензину, гасу, мазуту, одержуваних з нафти. У цьому полягає перша причина необхідності розвитку альтернативної енергетики. На відміну від ВДЕ (відновлюваних джерел енергії), викопні енергоносії швидко вичерпуються.
2. Відходи сільськогосподарського сектору і підприємств харчової промисловості можуть спричиняти викиди парникових газів в атмосферу та інші забруднення навколишнього середовища. Ці відходи вимагають великих витрат на утилізацію або захоронення, проте можуть бути використані як сировина для виробництва біогазу.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис		ВСТУП	Арк.	Аркушів
Розроб.		Веремчук Т.В.					
Перевір.		Щурська К.О.				6	
Затверд.		Щурська К.О.				КПІ ім. Ізгоря Сікорського, ФБТ	



Отримання біогазу з органічних залишків аграрного сектора економіки вважають одним з пріоритетних векторів розвитку зеленої енергетики. В Україні є значні сировинні можливості для виробництва біогазу за рахунок великого агропромислового комплексу (АПК). Сировиною для виробництва біогазу можуть бути як відходи тваринництва і рослинництва, так і спеціально вирощені культури.

Мета дипломного проекту - вибір та обґрунтування ефективної технології виробництва біогазу з відходів ВРХ та силосу кукурудзи.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі завдання:

1. Охарактеризувати гній ВРХ і силос кукурудзи у якості ко-субстрату як сировину для виробництва біогазу.
2. Описати технології для отримання біогазу, обрати оптимальну технологію та параметри процесу
3. Розглянути біохімічні процеси, що відбуваються при анаеробному зброджуванні та біологічні агенти, що беруть участь у процесі.
4. Розробити технологічну та апаратурну схеми виробництва біогазу з відходів ВРХ та силосу кукурудзи.
5. Розрахувати основні параметри біогазової установки, спроектувати метантенк.
6. Визначити основні вимоги охорони праці та захисту навколишнього середовища при виробництві біогазу.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

# РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, КІНЦЕВОГО ПРОДУКТУ. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ

## 1.1 Характеристика сировини

В якості субстратів (сировини) для анаеробного зброджування використовується широкий спектр органічних відходів (ОВ). Залежно від джерела їх поділяють на побутові, промислові і сільськогосподарські, а за фізичним станом - на рідкі (стічні води, фільтраційні води), напіврідкі (осади стічних вод, напіврідкий гній) і тверді (ТПВ, гній, відходи сільського господарства). Склад і характеристики різних видів відходів значно варіюють в залежності від джерела відходів, регіону, сезону року і ряду інших причин, що істотно впливають на технологічні аспекти анаеробного зброджування і продукцію біогазу. Такі параметри, як вологість відходів, склад ОВ, співвідношення сухої і органічної речовини, розмір часток, біодеградабельність та ін., істотно впливають як на тип біореакторів, так і на умови зброджування.

Агропромисловий сектор України виробляє значні обсяги органічних відходів, потенційно володіє ресурсами для виробництва біогазу, здатними замінити 2,6 млрд. м<sup>3</sup> природного газу на рік. При подальшому розвитку сільського господарства та широкому використанні рослинної сировини (силос, трави) цей потенціал може бути доведений за різними оцінками [1] від 7,7 до 18 млрд. м<sup>3</sup> /рік у перерахунку на природний газ. Для цього передбачається використовувати 6% орних (50% вільних від посівів) земель в Україні під вирощування кукурудзи на біогаз з консервативною величиною урожайності 30 т/га. При цьому частка біогазу з силосу кукурудзи складе 53,0% від загального потенціалу, з побічної продукції та відходів

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис				
Розроб.		Веремчук Т.В.			РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СИРОВИНИ, КІНЦЕВОГО ПРОДУКТУ. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ	Арк.	Аркушів
Перевір.		Щурська К.О.				8	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.		Щурська К.О.					

рослинництва - 5,7%, з побічної продукції та відходів харчової переробної промисловості - 5,3%, з гнойових відходів тваринництва - 36% (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Потенціал виробництва біогазу з відходів ВРХ та силосу кукурудзи [2]

Вид діяльності		Ферми ВРХ	Силос кукурудзи
Загальна кількість підприємств в Україні		5079	вирощування на 50% вільних орних земель
Обсяг основної продукції	голів тис. т	1 526.4	41 140.4
Загальний обсяг основних відходів	тис. т	15 431.6	-
Потенціал виробництва біогазу із загального обсягу відходів/продукції	млн м <sup>3</sup> /рік	385.8	7 405.5
Частка економічно доцільного потенціалу	на БГУ з міні-ТЕЦ від 0.1 МВт	97%	-

Відходи тваринництва можуть викликати багато екологічних проблем, таких як викиди парникових газів, аміак у повітрі, забруднення поверхневих і підземних вод, поширення хвороботворних бактерій, мух та інших комах, проблеми з запахом.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Відходи тварин, зокрема гній ВРХ – це субстрати, що є придатними та часто використовуються для виробництва біогазу. На це є ряд причин. Склад гною характеризується порівняно високою буферною ємністю, що запобігає різким змінам рН в реакторі. В складі гною присутні мікроорганізми, необхідні для процесу анаеробного зброджування, зокрема метаногени. Також в цьому субстраті достатньо мікро- та макроелементів, необхідних для метаболізму цих бактерій.

Фізико-хімічний склад відходів ВРХ (табл. 1.2) може варіюватись залежно від типу тварин, раціону харчування, способу утримання тварин, способу накопичення та відведення відходів. Оптимальними для вихідної гнойової біомаси є такі фізико-хімічні параметри: концентрація сухої речовини на рівні 8-12 % (не більше 12 %), вміст органічної речовини – не менше 80 %, співвідношення С : N = 30:1, рН–6,5-7,5 [3].

Табл.1.2 Фізико-хімічний склад гною ВРХ

Компонент	Вміст, % у сухій речовині
Органічна речовина	77-85
Сира клітковина	27,6-50,3
Жири	2,9-4,3
Білки	9,3-20,7
Лігнін	16-30
Азот	1,9-6,5
Фосфор	0,2-0,7
Калій	2,4
Кальцій	2,3-4,9
Магній	-
С:N	21:1
Вологість	86-87%

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Використання гною ВРХ у якості моно-субстрату має певні недоліки, які знижують вихід біогазу і ефективність роботи біогазової установки (БГУ). Саме тому широкого розповсюдження набуло використання ко-субстратів.

Перші роботи, присвячені вивченню спільного зброджування різних видів ОВ, з'явилися в кінці 1970-х рр., а новий підхід до вивчення ко-ферментації сформувався в середині 2000-х. В даний час ко-ферментація різних видів відходів вважається одним з найбільш ефективних способів підвищення ефективності і стабільності анаеробного зброджування. Суть ко-ферментації полягає в тому, щоб підібрати кілька субстратів і їх співвідношення таким чином, щоб збалансувати склад поживних речовин і сформувати оптимальні умови для зброджування (відношення С / N, вологість, рН), уникнути інгібування (контроль за концентрацією амонію, інгібіторів анаеробних мікроорганізмів), підвищити вихід біогазу та стабільність процесу, збільшити різноманітність мікроорганізмів, що беруть участь в деградації органічних відходів. Високий вміст вуглеводів і жирів у відходах веде до високого співвідношенню С/Н, а зі збільшенням кількості білків показник С/Н знижується. Надлишок вуглеводів загрожує дестабілізацією процесу в зв'язку з накопиченням надлишку ЛЖК, білків - з накопиченням амонію, жирів - з інгібуванням жирними кислотами[4].

Рослинні відходи мають високе співвідношення С/Н, відрізняються низьким рН, при їх зброджуванні часто спостерігається надмірне накопичення ЛЖК. У лігніноцелюлозних відходів з високим вмістом лігніну (деревні відходи) показник С/Н вище 100/1, що призводить до нестачі азоту для мікроорганізмів, що беруть участь в зброджуванні. Гній і пташиний послід характеризуються низьким співвідношенням С/Н. При їх зброджування виділяється багато амонію, який може пригнічувати процес.

Використання суміші субстратів дозволяє домогтися оптимального співвідношення поживних речовин, необхідних для росту мікроорганізмів, і

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

оптимального співвідношення C/N, а також уникнути дестабілізації процесу за рахунок накопичення ЛЖК, амонію та інших інгібіторів. У більшості випадків вихід біогазу при ко-ферментації вище, ніж сума виходів метану, що утворюється при зброджуванні окремих субстратів[3].

Силосна кукурудза на сьогоднішній день є найпопулярнішим видом культур для використання в біогазових установках. Кукурудза легко силосується і навіть при чистому використанні не викликає порушень в процесі роботи БГУ. Сьогодні вже є спеціальні сорти для використання в біогазових установках. Ці сорти як правило дають більший вихід біомаси.

Силос кукурудзи є одним з найбільш поширених в країнах ЄС та енергетично привабливих видів рослинної сировини для виробництва біогазу. Передумовами для вирощування кукурудзи на біогаз в Україні є сприятливі природно-кліматичні умови та багаторічний досвід вирощування традиційних сортів кукурудзи [5].

Компонентний склад органічної речовини (табл.1.3) та здатність її до біологічного розпаду визначають потенціал виходу метану із силосу кукурудзи.

Табл.1.3 Властивості силосу кукурудзи

Показник	Значення показника
Вологість, %	19,6
C:N	78:1
Азот, % у сухій речовині	0,2-0,93
Фосфор (PO <sub>4</sub> ), % у сухій речовині	0,2-0,8

Частка силосу кукурудзи в суміші з іншими ко-субстратами може складати від 2 до 99% При цьому, найбільш поширеними є біогазові установки, де частка силосу кукурудзи в суміші складає 25%.

За даними досліджень [5] при співвідношенні відходів ВРХ і силосу кукурудзи 4:1 спостерігається вихід біогазу 152 дм<sup>3</sup> на кг сухої речовини. За

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

співвідношення гній ВРХ:силос кукурудзи 9:1 вихід біогазу становить 194 дм<sup>3</sup> на кг сухої речовини (зброджування відбувалось при вологості 90% і перемішуванні).

Отже, завдяки сумісному зброджуванню можна отримати ряд переваг, а саме:

- зниження надмірної концентрації аміаку, що властива при зброджуванні лише гною;
- збільшення виходу метану внаслідок оптимізації співвідношення C:N;
- збільшення інтенсивності виходу біогазу на одиницю об'єму метантенку.

## 1.2 Обґрунтування вибору технології

Анаеробне зброджування – один з найефективніших методів обробки органічних відходів з отриманням енергії. Принципова схема технології наведена на рис.1.1. Відходи збирають у накопичувачі, потім завантажують в метантенк, де сировина проходить всі стадії зброджування з виділенням біогазу. Отриманий біогаз йде на когенераційну установку, де використовується для отримання електроенергії, частина якої забезпечує обігрів метантенку. Дигестат, отриманий унаслідок анаеробного зброджування відділяють від води і можуть використовувати як добриво.

Найпростіша система анаеробного зброджування містить один реактор, який відповідає за всі чотири етапи процесу. Його називають одноступеневою системою зброджування. Однак, поряд із розвитком науки та біотехнологій, вчені встановили, що кожен етап зброджування має різні оптимальні умови [6]. Тому ідея фізичного розділення етапів процесу (багатоступеневе

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

зброджування) має на меті оптимізувати кожен з них для досягнення найвищої продуктивності біотрансформації.

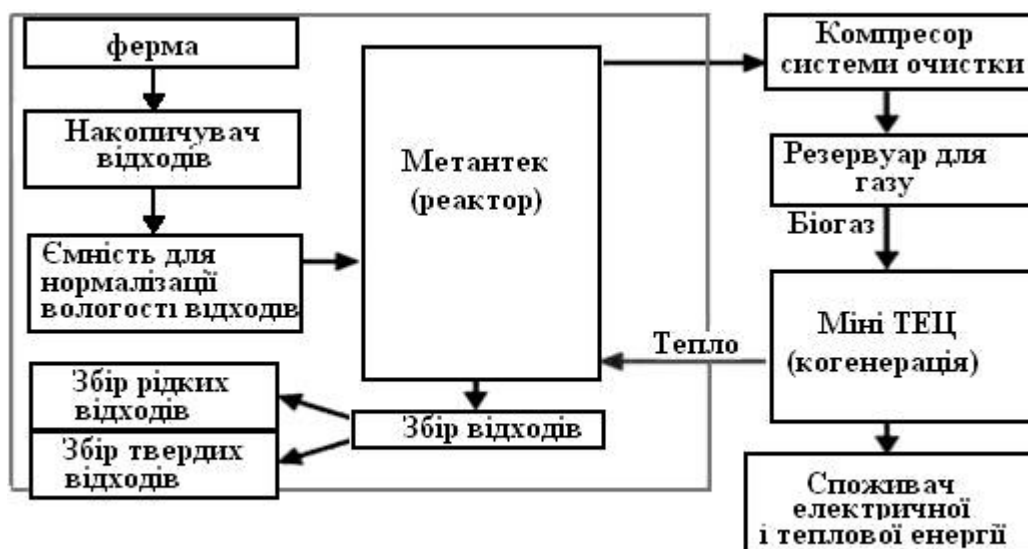


Рис.1.1 Схема отримання біогазу з відходів

В даний час багатоступеневі системи (рис.1.2) включають лише дво- та триступеневі системи. Двоступенева система здійснює гідроліз та метаногенез у двох різних реакторах. Більш складна, триступенева система здійснює гідроліз, ацидогенез/ацетогенез та метаногенез у різних реакторах.

Хоча розділ фаз найкращим чином відповідає умовам життєдіяльності бактерій і має свої переваги, багатоступеневі технології не мають великого поширення. Додаткові витрати на другий резервуар, на системи змішування, опалення та насоси мають досить великий період повернення капіталовкладень і можуть бути нерентабельними. Тому для даного проекту доцільніше використати одноступеневу технологію.

В одноступеневій технології умови (температура, рН та ін) задовольняють всі чотири етапи процесу. Однак метаногени є найбільш чутливими до умов навколишнього середовища, а також мають найповільніший ріст серед необхідних для зброджування мікроорганізмів.

						Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис		ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	



Тому умови навколишнього середовища в одноступеневих системах повинні бути оптимізовані для метаногенезу [7].

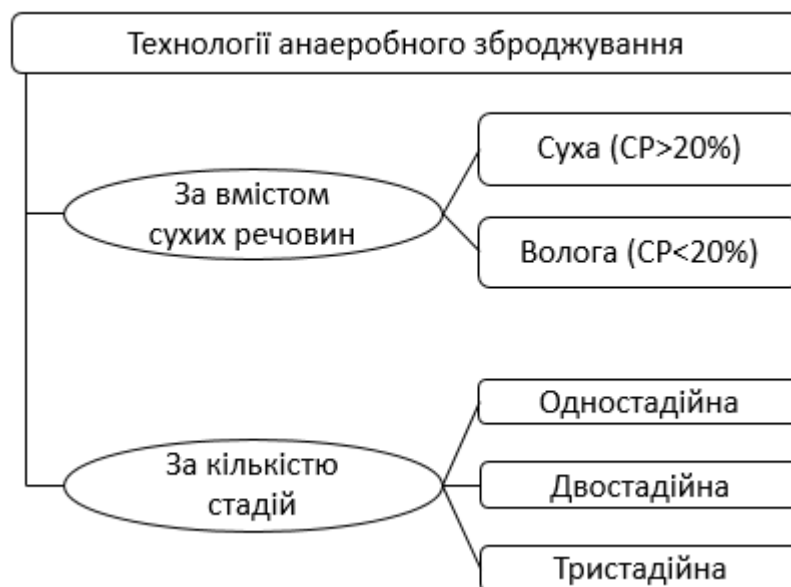


Рис. 1.2 Класифікація технологій анаеробного зброджування за вмістом сухих речовин та кількістю стадій

Технології виробництва біогазу з відходів класифікують по-різному, проте основна класифікація встановлена між сухими і вологими способами, і є дуже загальною (рис.1.2, а). Вона заснована на вмісті сухої речовини субстрату, де значення  $\leq 15\%$  визначається як вологе анаеробне зброджування, тоді як  $> 15\%$  вважається сухою анаеробною ферментацією.

Відходи з високим вмістом сухої речовини можна обробляти вологими системами зброджування, але до них потрібно додати велику кількість води. Розрідження потоку відходів вимагає не тільки великих витрат на споживання води та енергії, але й потребує реактора з більшим об'ємом. Крім того, розведення відходів може потягнути за собою зменшення виходу біогазу та збільшення кількості стічних вод. Тому сухі ферментери розроблені для обробки твердих відходів (рис. 1.3).

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

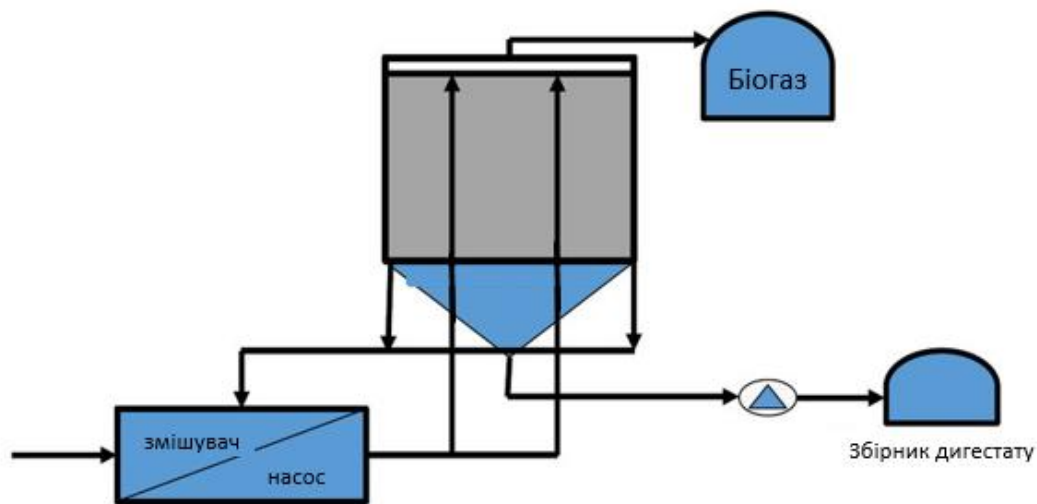
Основними проблемами роботи сухих систем у порівнянні з вологими є перемішування та відкачування субстрату з високою в'язкістю. В даний час технології Dranco, Valorga, Kompogas та Biocell є активно розвиваються в Європі [8].

Система Dranco (DRy ANaerobic COmposting) представлена вертикальним реактором (рис. 1.3 (а)) . У цій системі частину зброженого матеріалу відводять назад до змішувального насоса, де його змішують із свіжими матеріалами (розмір частинок  $<1$  см) для змішування в співвідношенні 6-8 : 1. Після цього суміш вводиться у верхню частину реактора і переміщується вниз до кінцевого дна, де гвинтовий конвеєр видаляє частину матеріалу. Решту зброженого матеріалу перед очищенням зневоднюють. В реакторі не відбувається активного перемішування, отже 20–30% біогазу може бути втрачено через неповне збродження.

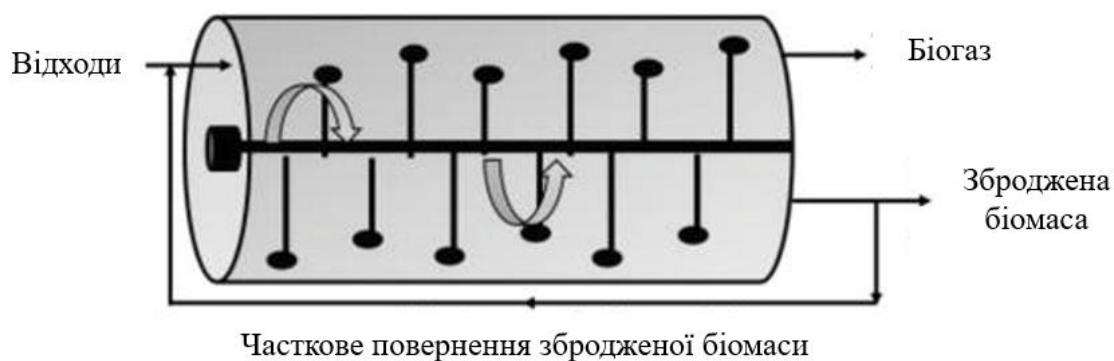
У системі Kompogas (рис. 1.3 (б)) використовується горизонтальний реактор із внутрішніми роторами для гомогенізації відходів. Поступаючий потік відходів (розмір частинок  $<1$  см) змішується з рідиною осаду для отримання СР в діапазоні 23–28% для нормальної течії системи. При більш високих значеннях СР виникають складнощі транспортування через занадто високу в'язкість. Система часто працює в термофільному режимі (55–60 ° С) 14–20 діб. Зневоднюють матеріал за допомогою шнекового преса, потім тверду частину компостують в умовах аерації протягом 2-3 тижнів [9]. З однієї тони відходів система може виробляти 130–150 м<sup>3</sup> біогазу, 500 кг компосту та 300 л рідкого добрива.

Система сухого періодичного анаеробного збродження “Bekon” (рис. 1.3 (в)) схожа на процеси, що відбуваються на полігоні ТПВ (твердих побутових відходів). Однак, на відміну від природної біодеградації на полігоні, процеси в системі періодичного сухого збродження прискорюється двома основними факторами.

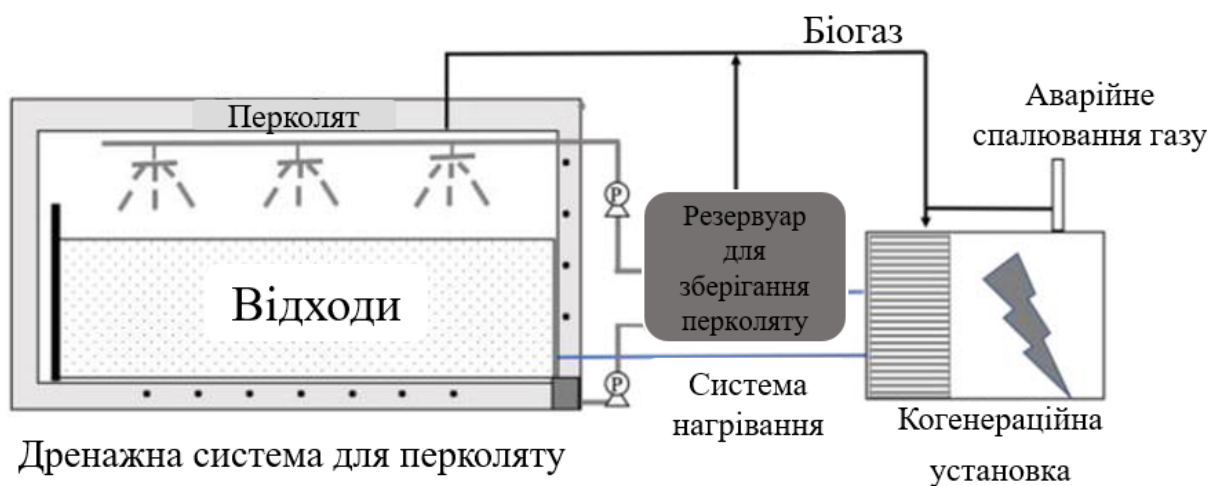
					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



а)



б)



в)

Рис. 1.3 Види систем анаеробного сухого зброджування [8,9]

							Арк.
							17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	

Перший - це безперервна рециркуляція фільтрату. Це дозволяє підтримувати вологість сировини та забезпечує рівномірне розповсюдження метаногенів та інших бактерій. Другий - температура в системах регулюється в оптимальних межах. Це забезпечує вищу ефективність утворення біогазу [8]. Реактор завантажують свіжими матеріалами (ТР 30-40%), вивантажують і потім заповнюють новою партією. Зброджування закінчується, коли виробництво біогазу припиняється. Після зброджування більш ніж 20 діб при мезофільній температурі, осад протягом 1–3 тижнів компостують. На кожному тону відходів система виробляє 90 кг біогазу (58% CH<sub>4</sub>), 455 кг стічних вод та 310 кг компосту [9]. Незважаючи на економію 40% вартості обладнання в порівнянні з системами безперервного сухого зброджування, системи сухих партій мають набагато нижчий коефіцієнт застосування, оскільки їм потрібно набагато більше місця для будівництва.

Сухі технології використовуються не тільки для обробки ТПВ, а і для відходів рослинництва і тваринництва. Проте зважаючи на нижчий вихід біогазу і високий вміст саме тваринних відходів у субстраті ефективніше використати вологу технологію.

Вологі технології виробництва біогазу призначені для сировини з вмістом сухої речовини менше 15%. Виходячи із характеру процесу бродіння, до метантенків пред'являють наступні вимоги: абсолютна герметичність стінок, що перешкоджає газообміну; непроникність для рідин; збереження міцності в статичному стані при дії власної сили тяжіння і маси субстрату, що завантажуються; досконала теплоізоляція; корозійна стійкість; надійність завантаження і спорожнення; доступність внутрішнього простору для обслуговування [10]. Існує декілька технологій з використанням різних метантенків (рис. 1.4) з перемішуванням або без.

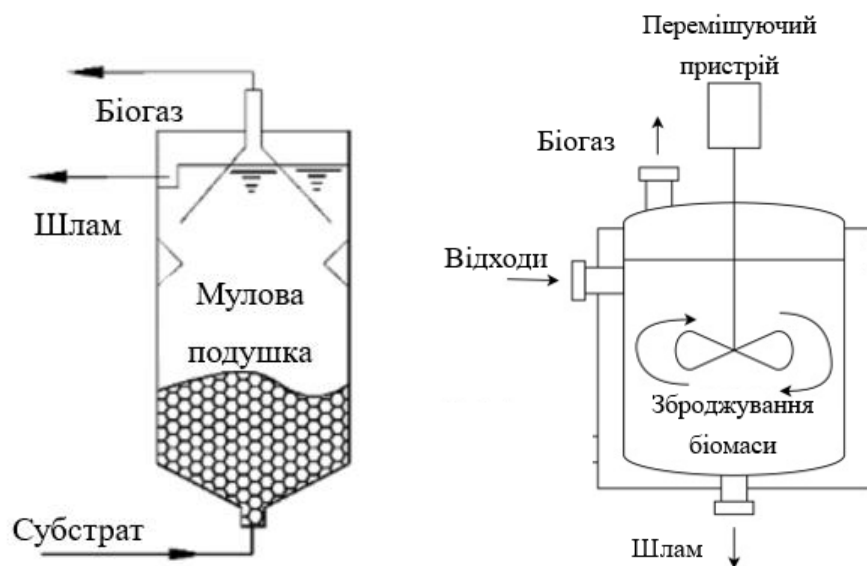
Проточний реактор (рис.1.4 (а)) нагадує горизонтальний циліндричний бак з герметичною кришкою. Оптимальна частка СР речовин в сировині для

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

таких метантенків становить 11-13%. Кожне нове завантаження матеріалу проштовхує попереднє далі по споруді, на виході отримуємо вже зброджений матеріал та біогаз. Тривалість процесу приблизно 15-20 діб. До недоліків цього способу можна віднести недостатній ступінь гомогенізації, а отже менший вихід біогазу.



а)



б)

в)

Рис. 1.4 Види систем вологого анаеробного зброджування [10,11]

Ефективнішою технологією є UASB (Upflow anaerobic sludge blanket), зображена на рис 1.4 (б). Потік відходів потрапляє в реактор знизу і тече вгору. Тому мікроорганізми в шарі мулу на дні розкладають органічну речовину в потоці відходів без процесу перемішування. Сепаратор речовина вгорі

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

відокремлює мул від стоків і збирає біогаз. Однак ця технологія потребує більших експлуатаційних витрат.

Найчастіше у вологій технології використовуються метантенки типу CSTR (Continuous stirred-tank reactor), рис.1.4 (в). В реактор подають сировину, яку постійно перемішують, щоб забезпечити гомогенізацію вмісту реактора. При цьому з реактора видаляється рівна кількість стоків.

Час утримування в реакторі може змінюватись залежно від природи використовуваної сировини та температури процесу, і становить, як правило, від 2 до 4 тижнів. Такі системи мають низькі експлуатаційні витрати.

Зазвичай такі метантенки використовуються для зброджування сировини з вологістю 90-98%. Вони застосовуються на практиці для обробки гною тварин, осадів стічних вод, побутових відходів, сільськогосподарських відходів або сумішей цих субстратів. Перемішування створює однорідний субстрат, запобігаючи розшаруванню та утворенню поверхневої кірки.

Це найоптимальніша технологія для субстрату, описаного в розділі 1.1 з огляду на капітальні та експлуатаційні витрати, вихід біогазу, параметри процесу та сировини.

Швидкість процесу бродіння залежить від температури. Важливим є те, що чим вища температура, то швидше відбувається розкладання. Температурні режими, в яких себе добре відчують відповідні штами бактерій:

- психрофільні штами при температурі нижче 25°C;
- мезофільні штами при температурі 25-45°C;
- термофільні штами при температурі понад 45°C.

Згідно з дослідженнями [11] вихід біогазу при термофільному режимі зброджування приблизно на 30 % більше, ніж при мезофільному. Але через більш високу температуру витрата тепла на власні потреби процесу в термофільного режиму збільшується в 1,5 рази (у відсотковому відношенні до

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

теплового еквівалента виділеного біогазу), у той час як кількість товарного біогазу практично однакова з мезофільним режимом. Отже, обираємо мезофільний режим зброджування.

Технологія виробництва біогазу з відходів тваринництва і рослинництва з подальшою утилізацією для виробництва електричної та теплової енергії в когенераційній установці (КГУ) зображена на рис.1.5.

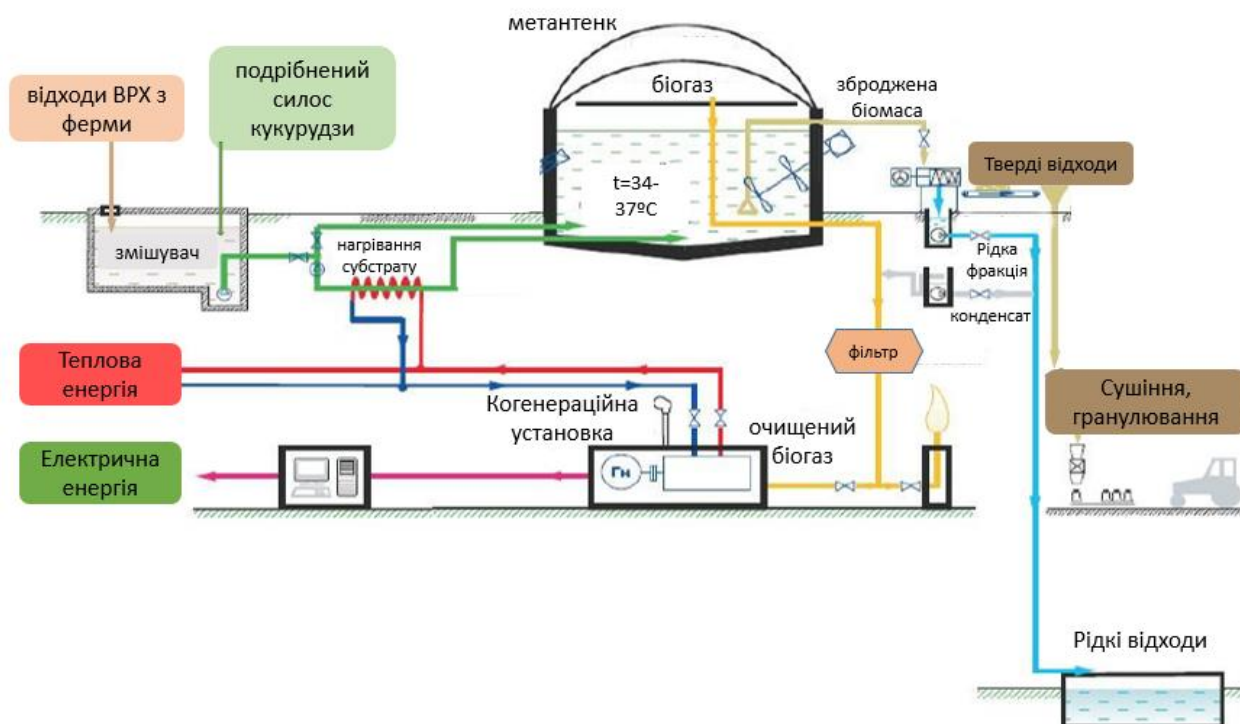


Рис. 1.5. Технологічна схема типової біогазової установки для переробки відходів ВРХ та силосу кукурудзи, з виробництвом електричної та теплової енергії в КГУ [12]

За періодичністю технології отримання біогазу поділяють на безперервну та періодичну. Безперервна - постійне або з короткими перервами надходження сировини до реактора та виведення маси, що перебродила. Сировина повинна бути рідка або напіврідка. Технологія потребує невеликих ферментаційних камер. Резервуари можуть бути різні, перемішування тяж (механічні мішалки, перекачування сировини, продування біогазу). При періодичній технології нова сировина надходить у метантенк тільки після

						Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис		ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	

повного видалення попередньої партії. Безперервна технологія забезпечує стабільність виходу біогазу, потребує менше обслуговування, не вимагає тривалого накопичення сировини, тому обираємо саме цю технологію.

Важливо зазначити, що перед утилізацією на КГУ, біогаз очищаємо від надлишкової вологи за допомогою системи труб, розташованих під землею (відбувається конденсація води через різницю температур). Також необхідне очищення біогазу від сірководню. Найбільш простим і економічним способом є суха очистка в спеціальному фільтрі.

### 1.3 Характеристика та використання біогазу

Біогаз є цінним енергоносієм, який можна застосовувати з різними цілями і з високою ефективністю, в першу чергу для отримання електроенергії, опалення та обігріву подачі гарячої води, для сушки та ін.

Оскільки тільки метан поставляє енергію з біогазу, доцільно, для опису якості газу, виходу газу і кількості газу все відносити до метану, з його нормованими показниками. Об'єм газів залежить від температури і тиску. Високі температури призводять до розтягування газу і до зменшуваного разом з об'ємом рівню теплоти згорання і навпаки. Крім того при зростанні вологості теплота згорання газу також знижується. В цілому, вихід метану виражають в м<sup>3</sup> метану на кг органічної сухої речовини. Цей показник набагато точніший, ніж м<sup>3</sup> біогазу на м<sup>3</sup> свіжого субстрату.

Якість біогазу визначається в першу чергу вмістом метану або співвідношенням метану (CH<sub>4</sub>) до двоокису вуглецю (CO<sub>2</sub>). Двоокис вуглецю викликає втрати при зберіганні біогазу. Тому важливо прагнути до високого вмісту метану і якомога низькому вмісту двоокису вуглецю.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



Біогаз містить 40– 70% метану ( $\text{CH}_4$ ), 30–60% вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), біля 1% сірководню ( $\text{H}_2\text{S}$ ) і невелику кількість азоту ( $\text{N}_2$ ), водню ( $\text{H}_2$ ), водяної пари та аміаку ( $\text{NH}_3$ ). Об'ємна теплота згоряння біогазу складає 22 МДж/м<sup>3</sup>. Теплота згоряння в залежності від вмісту метану перебуває в межах 5-7 кВт\*год / м<sup>3</sup> біогазу, в середньому близько 6,0 кВт\*год / м<sup>3</sup>. Біогаз має нижчу теплоту згоряння в порівнянні з природним газом, пропаном і метаном, але в два рази вищу, ніж водень. Біогаз має густину 1,2 кг/м<sup>3</sup>, є трохи легшим за повітря. Має температуру спалаху близько 700 °С.

Вміст метану в біогазі в першу чергу визначається наступними критеріями:

- умови проходження процесу;
- склад субстрату;
- Температура субстрату..

Після метану і двоокису вуглецю, сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) є найважливішою складовою біогазу. Сірководень дуже агресивний і викликає корозію, що в першу чергу викликає проблеми з арматурою, газовими лічильниками, пальниками і двигунами. Тому необхідно очищати біогаз від сірки. Очищений від сірки біогаз майже не має запаху.

Крім того в біогазі містяться сліди аміаку, елементарного азоту, водню і кисню загальним змістом від 6 до 8%. Газ, що надійшов з біогазової установки насичений водяною парою, що може викликати проблеми при спалюванні біогазу в котлах та двигунах. Видалення зайвої вологи з біогазу методом конденсації є дуже важливим кроком по збагаченню газу. За допомогою конденсованої води сепарують також певну кількість аміаку, що міститься в біогазі і викликає пошкодження двигуна, особливо на підшипниках з кольорових металів [13].

Ступінь очищення біогазу залежить від мети його подальшого використання. Для подачі у місцеву мережу газопостачання необхідна очистка

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

біогазу до вмісту метану 96-98%. Для спалювання на когенераційній установці (відповідно до обраної технології) необхідний вміст метану – не нижче 45%. Для КГУ існують граничні концентрації сірководню і біогазі, адже продукти його окиснення мають сильні корозійні властивості. Оптимальні характеристики біогазу, призначеного для отримання електроенергії за допомогою КГУ наведені у таблиці 1.4

Табл. 1.4 Вимоги до біогазу, призначеного для когенерації

Компонент	Оптимальний/гранично допустимий вміст
CH <sub>4</sub> , %	60-80
CO <sub>2</sub> , %	20-40
H <sub>2</sub> S, мг/м <sup>3</sup>	8000
O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , %	<1

Отриманий біогаз має відповідати вимогам визначеним у наступних документах: ДСТУ 7721:2015 «Газоподібне паливо. Біогаз. Технічні вимоги і методи контролю», ДСТУ 7509:2014 «Газоподібне паливо. Біогаз. Методи відбору проб», ДСТУ 4516: 2006 «Поновлювані джерела енергії. Установки біогазові».

Існує декілька способів використання біогазу.

**Біогаз як паливо.** Для використання в якості палива біогаз слід очищати до рівня якості природного газу, оскільки його спалюватимуть в двигунах, розрахованих на природний газ. В даний час серед автомобілів існують такі, що розраховані на 100% на біогаз. Біогаз як паливо не обкладається податками.

Дуже поширене використання біогазу в якості палива в Швеції. Там майже половина транспортних засобів працюють на біогазі, загальною потужністю близько 90 МВт [14].

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

**Подача в газову мережу.** подача біогазу в мережі громадського користування відкриває для виробництва біогазу нові перспективи. Це дозволяє використовувати газ там, де він фактично потрібен. Таким чином можна зменшити великі втрати через відсутність використання надлишку тепла і покращити загальні показники ефективності виробництва енергії. Однак, існують серйозні перешкоди, що стосуються транспортування і якості біогазу.

Для використання в газових мережах біогаз повинен містити високий вміст метану і низький вміст сірководню, щоб наблизитися до характеристик природного газу (табл. 1.5). Для цього необхідно проводити його очищення і сушку, також слід довести його до існуючого в газомережі тиску.

Табл. 1.5. Вимоги до вмісту біогазу для подачі в газову мережу.

Метан	96%
Вуглекислий газ	<3%
Кисень	<0,5%
Загальний вміст сірки	<120 мг/м <sup>3</sup>
Сірководень	<5 мг/м <sup>3</sup>
Волога (точка роси під тиском)	<(-10)-(-30)°C
Пил	<1µм
Олії	<100-200 ppm

Рентабельність очищення газу до якості природного газу виправдовує себе лише при великій витраті палива. Вважається, що система очищення виправдовує себе для установок, які виробляють від 250 м<sup>3</sup> / год газу.

**Опалення біогазом.** При опаленні біогазом розрізняють опалювальні котли з атмосферними пальниками невеликої потужності від 10 до 30 кВт, а також паяльні пальники для більшої потужності. Опалювальні котли

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

розраховані на роботу одного буферного накопичувача, що дає тепло для будинку, метантенку, промислового водопостачання і потреб ферми. Дешевою альтернативою котла є перколятор (газова колонка), що працює на одному атмосферному пальнику і застосовується в першу чергу для обігріву промислового водопостачання.

**Охолодження за допомогою біогазу.** Тепло потрібно в першу чергу в зимовий період. Щоб використовувати надлишок тепла також в літній час, використовуються генератори, виробляють електроенергію-тепло-холод. У них теплова енергія в так званих адсорбуючих установках трансформується в холод і може потім застосовуватися з метою охолодження напр. у великих холодильних установках. На жаль, коефіцієнт їх корисної дії дуже малий. Цей спосіб майже не використовується.

**Когенерація** – це спільне вироблення теплової та електричної енергії в результаті спалювання теплоносія в газопоршневих установках. Крім того, когенераційні установки при необхідності дозволяють виробляти пару, холод і вуглекислий газ. Надлишок тепла, який з'являється при роботі двигуна з системи охолодження і вихлопних газів можна використовувати для опалення. Цей спосіб отримав найбільше поширення.

Електричну енергію, отриману при когенерації можна продати державі за «зеленим» тарифом, а тепло направити на власні потреби підприємства або найближчих поселень. Ключовий фактор тут - «зелений» тариф, оскільки витрати на будівництво і експлуатацію заводу з вироблення біогазу можуть бути досить високими. Власне держава застосовує цей інструментарій, щоб дотувати підприємства і забезпечити їм економічне виправдання використанню альтернативних газів [13].

Спалювання на когенераційній установці не потребує високих ступенів очищення біогазу від домішок, забезпечує потреби БГУ в тепловій та

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

електричній енергії, а також дозволяє продавати електроенергію за «зеленим» тарифом, що дає економічні переваги.

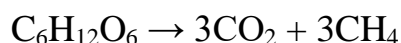
Отже, використання силосу кукурудзи як ко-субстрату для зброджування гною ВРХ збільшує відношення C:N, що попереджає інгібування процесу аміаком. Для оптимальних показників сировини, що йде на виробництво біогазу, було визначено співвідношення гною ВРХ і силосу кукурудзи 9:1. В результаті аналізу технологій для сумісного зброджування було обрано систему вологого типу, в якій використано реактор з механічним перемішуванням. Обрано безпереврний режим роботи метантенку при мезофільних умовах зброджування. Отриманий біогаз спалюється на когенераційній установці з отриманням тепла та електроенергії.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

## РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНИХ АГЕНТІВ

### 1.1. Схема перебігу процесів

В основі технології виробництва біогазу з відходів тваринництва і рослинництва лежить анаеробне зброджування – послідовність процесів, в яких мікроорганізми розщеплюють складні сполуки за відсутності кисню з утворенням метану і вуглекислого газу:



Процес анаеробного зброджування можна розділити на чотири основні стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез (рис 2.1).

I етап – гідроліз. У більшості випадків біомаса складається з великих органічних полімерів. Щоб бактерії в анаеробних реакторах отримували доступ до енергетичного потенціалу матеріалу, ці ланцюги спочатку необхідно розкласти на мономери, такі як цукри, які легко доступні іншим бактеріям. Гідроліз цих високомолекулярних полімерних компонентів є необхідним першим кроком в анаеробному зброджуванні. Шляхом гідролізу складні органічні молекули розпадаються на прості цукри, амінокислоти та жирні кислоти.

Ацетат і водень, що утворюються на перших стадіях, можуть використовуватися безпосередньо метаногенами. Інші молекули, такі як леткі жирні кислоти з довжиною ланцюга, більшими за довжину ацетату, повинні спочатку катаболізуватися в сполуки, які можуть безпосередньо використовуватися метаногенами.

					<i>ЕКБ.БЕ6103.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Веремчук Т.В.</i>			РОЗДІЛ 2. БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ХАРАКТЕРИСТИКА БІОЛОГІЧНИХ АГЕНТІВ	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Щурська К.О.</i>				28	
						<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ</i>	
<i>Затверд.</i>		<i>Щурська К.О.</i>					

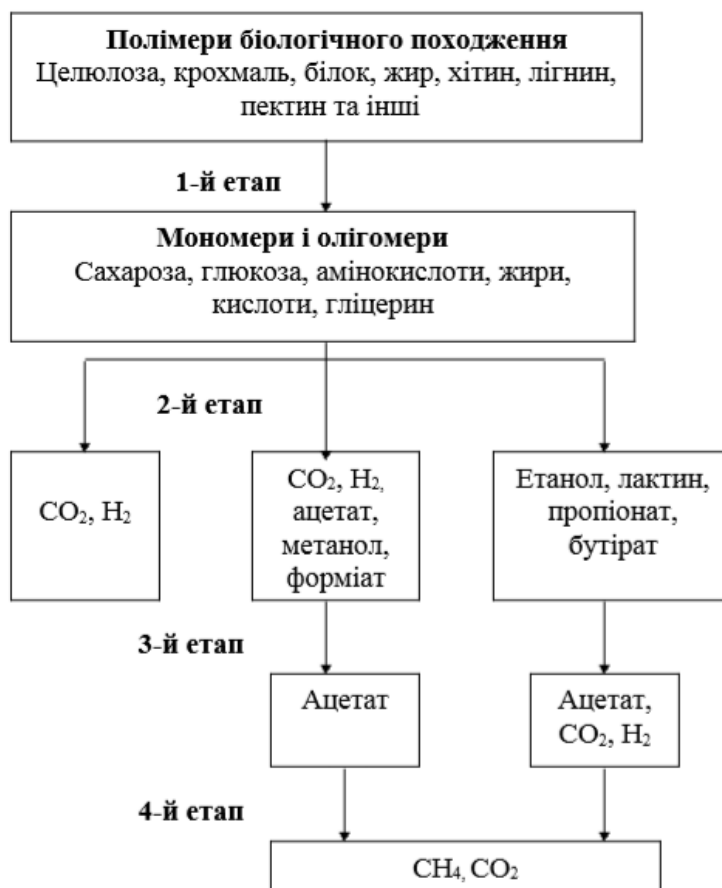


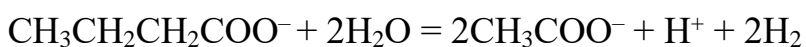
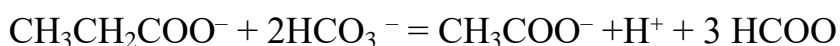
Рис. 2.1 Основні фази мікробної деградації складних органічних речовин до метану в анаеробних умовах [15]

II етап – ацидогенез. Поглинаючи продукти гідролізу через клітинні мембрани, ацидогенні мікроорганізми здатні утворювати проміжні жирні кислоти та інші продукти, такі як ацетати, і більші органічні кислоти, такі як пропіонат і бутират, зазвичай у співвідношенні, що варіюється від 75:15:10 до 40:40:20. На цій стації також утворюються невеликі кількості етанолу та лактату. Питомі концентрації проміжних продуктів, що утворюються на стадії ацидогенезу, можуть залежати від умов розщеплення; концентрація жирних кислот може суттєво коливатися в залежності від рівня pH [...]

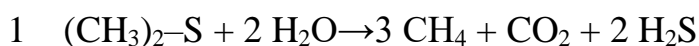
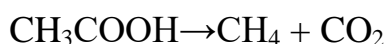
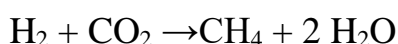
Як правило, ацидогенез протікає швидше ніж всі інші стадії анаеробного зброджування, ацидогенні бактерії мають час регенерації менше 36 год [...]. Важливо зазначити, що, хоча на етапі ацидогенезу утворюються прямі

попередники для кінцевої стадії метаногенезу, підкислення жирними кислотами є причиною гальмування подальшого перебігу процесу.

III етап – ацетогенез. На цій стадії вищі жирні кислоти перетворюються в ацетат, також утворюється водень. Амінокислоти з парною кількістю вуглецю можуть утворювати оцтову кислоту, а з непарною кількістю – спочатку утворюють пропіонову. Оцтова кислота дисоціює на аніон ацетату й катіон водню:



IV етап – метаногенез. На цій стадії відбувається утворення метану з оцтової кислоти, а також в результаті реакції відновлення воднем вуглекислого газу:



## 2.2 Характеристика мікроорганізмів, що беруть участь в анаеробному зброджуванні

На стадії гідролізу біополімери (білки, жири і полісахариди) розкладаються гідролітичними бактеріями до відповідних мономерів за рахунок активності позаклітинних ферментів (протеаз, ліпаз, амілаз, целюлаз і т.д.), що прикріплені до клітинної стінки або виділяються в середовище. Гідролітичні бактерії відрізняються високими швидкостями росту і стійкістю до змін умов середовища (можуть метаболізувати при рівні pH від 4 до 11,

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



оптимальний рівень рН становить 6-8). Вони існують в умовах надлишку субстрату, поки весь субстрат не гідролізує.

Багато гідролітичних бактерій є факультативними анаеробами. При зброджуванні стійких субстратів, наприклад, лігноцелюлози, гідроліз стає лімітуючою стадією анаеробного процесу. Гідролітичні бактерії філогенетично різноманітні. Найбільша кількість гідролітиків зустрічається серед представників *Bacteroidetes* і *Fimicutes*. Залежно від речовин, що розкладаються бактеріями, їх підрозділяють на протеолітичні, гліколітичні і ліполітичні. Протеолітики зустрічаються серед представників родів *Clostridium*, *Coprothermobacter*, *Anaerosalibacter*, *Caloramator*, *Butyrivibrio* і ін. Гліколітичні бактерії поширені серед родів *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Thermoanaerobacter*, *Acetivibrio*, *Fibrobacter* і ін. Ліполітичні бактерії зустрічаються в родах *Clostridium*, *Bacillus*, *Selenomonas* і ін. Багато бактерій мають здатність гідролізувати різні типи біополімерів, а потім зброджувати утворені мономери. Анаеробні гриби також відіграють велику роль в розкладанні органічних речовин [16].

На стадії ацидогенезу продукти гідролізу перетворюються бродильними бактеріями в суміш ЛЖК (ацетат, пропіонат, бутират, ізобутират, валерат, ізовалерат), лактат, спирти, форміат, водень і CO<sub>2</sub>. оптимальний рівень рН для ацидогенів – 5,5–6,5. Гідролітичні бактерії забезпечують ацидогенних субстратами для росту. Ацидогенні бактерії, в свою чергу, підтримують концентрацію продуктів гідролізу на певному рівні, необхідному для синтезу гідролітичних ферментів. Бродильні бактерії відрізняються високими швидкостями росту і метаболізму, тому при недостатній активності мікроорганізмів, які утилізують ЛЖК, відбувається їх накопичення. Бродильні бактерії розрізняються залежно від здатності утворювати молекулярний водень. До бактерій, які не здатні утворювати водень в якості продукту бродіння, відносяться молочнокислі і пропіоновокислі бактерії [15].

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Продукти метаболізму бактерій, здатних утворювати водень, варіюють в залежності від парціального тиску водню: при низькому парціальному тиску водню утворюються ацетат і CO<sub>2</sub>, при високому - ЛЖК, етанол і лактат. Ацидогенні бактерії зустрічаються серед представників *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Firmicutes* u *Proteobacteria*, в родах *Bacteroides*, *Spirochaeta*, *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Streptococcus*, *Enterococcus* та ін.

Ацетогенна (синтрофна) стадія є однією з найважливіших стадій анаеробного розкладання органіки. ЛЖК і спирти, що утворилися в результаті попередніх стадій, окислюються бактеріями до субстратів метаногенезу – ацетату, водню і CO<sub>2</sub>.

Пропіонат і бутират є основними проміжними продуктами розкладу органічної речовини після ацетату. Залежно від зброджуваного субстрату близько 20-43% метану утворюються в результаті повного мікробного розкладання пропіонату і бутирату синтрофними бактеріями і метаногенними археями.

Пропіонат-окиснюючі бактерії. Синтрофне розкладання пропіонату протікає тільки при концентрації водню нижче 10<sup>-4</sup> атм. Більшість пропіонат-окиснюючих синтрофів здійснюють процес через метилмалоніл-КоА шлях.

Другий шлях реалізує тільки один відомий на цей момент вид - *Smithella propionica*. Дві молекули пропіонату перетворюються в одну молекулу бутирату і одну молекулу ацетату, потім бутират окислюється до двох молекул ацетату і водню [16].

До пропіонат-окиснюючих синтрофних бактерій відносяться представники родів *Syntrophobacter*, *Smithella*, *Pelotomaculum*, *Desulfotomaculum*.

Бутират-окиснюючі бактерії. Розкладання бутирату і кислот з більш довгим ланцюгом здійснюється шляхом β-окислення, основою якого є відщеплення ацетильних груп, які через ряд перетворень перетворюються в

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

ацетат, водень і форміат. У своєму метаболізмі активно розкладають бутират бактерії родів *Syntrophomonas*, *Syntrophus*, *Syntrophothermus*, *Thermosyntropha*.

Останнім часом з'являється все більше доказів великого значення синтрофних ацетат-окиснюючих бактерій (САОБ), здатних здійснювати реакції розкладання ацетату до водню і вуглекислоти в присутності метаногенів, що використовують водень.

В даний час виділено лише кілька САОБ, а саме: термофільні *Thermacetogenium phaeum* і *Pseudothermotoga lettingae*, термотолерантні *Tepidanaerobacter acetatoxydans* і мезофільні *Clostridium ultunense* і *Syntrophaceticus schinkii* [17].

САОБ активно беруть участь в розкладанні ОР, вважається, що найбільший внесок у процес вони вносять при зміні умов зброджування, наприклад, підвищення навантаження по ОР в біореакторі, підвищенні температури, а також при високій концентрації амонію і водню.

До ацетогенних бактерій відносяться також гомоацетогени, які здатні здійснювати синтез ацетату з водню і вуглекислого газу ( $4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 = \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$ ). Гомоацетогени сприяють переключенню шляху метаногенеза в сторону ацетокластичного і можуть конкурувати за водень з гідрогенотрофними метаногенами, однак, спорідненість гомоацетогенів до водню істотно нижче і їх активність досить мала.

Процес анаеробного зброджування завершують метаногени. Середовищем існування для метаногенів є морські і прісноводні донні осади, шлунково-кишковий тракт тварин, болота, затоплені ґрунти, полігони ТПВ, гноєсховища та інші природні і антропогенні екосистеми.

Здатність утворювати метан мають 50 видів з 17 родів, що відносяться до архей, які філогенетично дуже неоднорідні. Метаногенні археї представлені такими порядками: *Methanococcales*, *Methanobacteriales*, *Methanosarcinales*, *Methanomicrobiales*, *Methanopyrales* і *Methanocellales*. Усі метаногени

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

облігатні анаероби, ріст яких пригнічується за кількості кисню в газовій фазі у 0,004%. Більшість з них мезофіли, і мають оптимум росту при 30-40°C, оптимум pH - 6,5-7,5.

Гідрогенотрофні метаногени використовують CO<sub>2</sub> в якості субстрату і H<sub>2</sub> в якості донора електронів. Процес відновлення CO<sub>2</sub> в метан відбувається в декілька етапів. До гідрогенотрофних метаногенів відносяться більшість представників порядків *Methanobacteriales*, *Methanomicrobiales*, *Methanococcales*, *Methanopyrales* і *Methanocellales*. Саме ці організми відіграють важливу роль у здійсненні процесу ацетогенезу за рахунок споживання водню.

Використовувати ацетат в якості субстрату для утворення метану здатні тільки представники родів *Methanosarcina* і *Methanothrix* (*Methanosaeta*) – ацетокластичні метаногени. Для представників роду *Methanothrix* ацетат є єдиним субстратом, до якого вони проявляють дуже високу спорідненість.

Представники роду *Methanosarcina* володіють найширшим спектром субстратів, які можуть утилізувати: активно використовують ацетат, різні метиловані C1-з'єднання, а також суміш H<sub>2</sub> з CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> з CO.

Метилотрофні метаногени здатні використовувати метанол, метиламіни, метиловані сполуки сірки. Більшість метилотрофних метаногенів відносяться до порядку *Methanosarcinales* (*Methanomethylovorans*, *Methanohalophilus*, *Methanohalobium*, *Methanosarcina thermophila* та ін.).

Отже, анаеробне зброджування – складний багатоступінчастий процес, в якому задіяні різноманітні мікроорганізми, що метаболічно і філогенетично відрізняються один від одного. Трофічні зв'язки, що реалізуються в угрупованні, роблять можливим трансформацію з'єднань, недоступну індивідуальним мікроорганізмам. Метаногени найбільш чутливі до зміни умов навколишнього середовища серед бактерій, що беруть участь в анаеробному зброджуванні.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

## РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1 Опис технологічного процесу

#### ДР 1 Підготовка обладнання

Перед запуском обладнання необхідно перевірити його на герметичність. Це здійснюється за допомогою повітря під тиском.

#### ДР 2 Підготовка теплоносія

Теплова енергія, отримана зі стадії ТП 7 йде на нагрівання повітря для стадії сушіння збродженої біомаси (ПВ 8.2)

#### ДР 3 Підготовка сировини

##### ДР 3.1 Накопичення сировини в приймальному бункері

Відходи, що утворилися на фермі, зберігаються у спеціальному бункері

##### ДР 3.2 Подрібнення силосу кукурудзи

Силос кукурудзи подрібнюють за допомогою молоткової дробарки для отримання частинок, розміром  $d < 1$  см

##### ДР 3.3 Змішування сировини

Змішування гною ВРХ та подрібненого силосу кукурудзи відбувається в апараті, обладнаному пропелерною мішалкою

##### ДР 3.4 Нагрівання субстрату

Нагрівання субстрату перед подачею в метантенк необхідне для підтримання в ньому визначеної параметрами зброджування температури. У нагрівачі температура субстрату досягає  $35^{\circ}\text{C}$ . Нагрівання здійснюється за рахунок тепла, отриманого на стадії ТП 7.

#### ТП 4 Зброджування субстрату в метантенку

Анаеробне зброджування відбувається в мезофільних умовах ( $t=35\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) в безперервному режимі. В процесі в метантенк подається свіжий нагрітий

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис				
Розроб.		Веремчук Т.В.			РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	Арк.	Аркушів
Перевір.		Щурська К.О.				35	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.		Щурська К.О.					

субстрат і видаляється зброджена біомаса. рН підтримується в межах 4,5-7,5. При надмірному закисленні середовища додають  $\text{CaCO}_3$  для підвищення рівня рН. Підтримання температурного режиму відбувається за рахунок тепла від ТП 7.

#### **ТП 5 Збір біогазу**

Біогаз видаляється з метантенку і подається на очищення

#### **ТП 6 Очищення біогазу**

##### **ТП 6.1 Видалення вологи**

Видалення вологи відбувається за допомогою системи труб, розміщених під землею на глибині 1 м. Пара конденсується на стінках труб за рахунок різниці температур. Труби розташовані під нахилом 2-4°, що дозволяє зібрати видалити конденсовану вологу.

##### **ТП 6.2 Очищення від сірководню**

Очищення біогазу від сірководню відбувається на сухому фільтрі.

##### **ТП 6.3 Накопичення біогазу в газгольдері**

Очищений біогаз збирається в газгольдері, де зберігається під тиском 0,5 МПа, далі подається на когенераційну установку

#### **ТП 7 Отримання електроенергії і тепла**

Біогаз спалюють на когенераційній установці для отримання електроенергії та тепла. Електроенергія подається споживачеві (в мережу), а теплова енергія використовується для ДР 2, ДР 3.4, ТП 4. На КГУ подається повітря для нормального перебігу процесу спалювання.

#### **ПВ 8 Виділення і обробка твердої фракції**

##### **ПВ 8.1 Відділення вологи**

Відділення рідкої фракції відбувається на фільтр-пресі, фільтрат подається на ПВ 9. Тверда фракція (шлам) з вологістю 40-60% подається на сушіння.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

### ПВ 8.2 Сушіння шламу

Сушіння відбувається до вмісту вологи 12% за допомогою теплоносія з ДР 2. Завдяки цьому процесу відбувається термічне знезараження шламу.

### ПВ 8.3 Гранулювання

Процес відбувається на грануляторі, отриманий продукт використовується у якості біодобрив.

### ПВ 9 Відстоювання рідких відходів в лагунах

Рідкі відходи накопичуються в лагунах. Рідина після відстоювання може використовуватись для потреб ферми (для системи гноєвидалення та ін).

## 3.2 Сировина та матеріали

Характеристика сировини, необхідної для процесу анаеробного зброджування наведено в табл. 3.1

Таблиця 3.1 Характеристика сировини для отримання біогазу

Найменування	Категорія, якою регламентується сировина	Обов'язкові для перевірки показники та їх значення	Примітка
Основна сировина:			
Гній ВРХ	Згідно з технологічним регламентом	Вологість, рН та ін.	
Силос кукурудзи	Згідно з технологічним регламентом	Вологість, діаметр часток	
Допоміжна сировина:			

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

CaCO <sub>3</sub>	Згідно з технологічним регламентом	Для нейтралізації рН
-------------------	------------------------------------	----------------------

### 3.3. Матеріальний баланс

Матеріальний баланс технологічного процесу наведено в таблиці 3.2. Ця таблиця відображає інформацію про види і кількість сировини, допоміжних матеріалів, проміжних та кінцевих продуктів.

Таблиця 3.2. Матеріальний баланс виробництва по добовій витраті

Використано			Отримано		
Назва сировини та матеріалів	Кількість		Назва кінцевого продукту або напівпродукту, відходів та втрат	Кількість	
	м³	кг		м³	кг
ДР 3.3					
Гній ВРХ		49500	Гомогенізований субстрат		53700
Силос кукурудзи		4200			
Всього:		53700			53700
ТП 4					
Гомогенізований субстрат		53700	Зброджена біомаса		52900
			Біогаз	644,4	773,3
			Втрати		26,7
Всього:		53700	Всього:		53700
ПВ 8.1					

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



Зброджена біомаса		52900	Тверда фракція		9733,6
			Рідка фракція		43166,4
Всього:		52900	Всього:		52900
ПВ 8.2 – 8.3					
Шлам		9733,6	Гранульоване добриво		5482,1
			Залишкова волога		4251,5
Всього:		9733,6	Всього:		9733,6

### 3.4 Контроль виробництва

Контроль виробництва здійснюється на стадіях процесу за контрольними точками і параметрами, які наведені в табл.3.3.

Таблиця 3.3 Точки та параметри контролю виробництва біогазу

Назва стадії, процесу	Параметр контролю	Частота контролю	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Методи контролю	Спосіб контролю параметра, тип приладу

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

ДР 1. Підготовка обладнання	Герметичність	Перед запуском в експлуатацію	Повна герметичність	Технологічний	Автоматично
ДР 3.1 подрібнення сировини	Діаметр частинок		$d < 3 \text{ см}$	Технологічний	
ТП 4 Зброджування субстрату в метантенку	Рівень заповнення апарату; температура; рН	регулярно	$K_3=0,8$ $t=35\pm 3^\circ\text{C}$ $pH=5,5-7,5$	Технологічний, хімічний	Рівнемір, рН-метр, Термопара
ТП 6.1 Видалення вологи	Вміст вологи	регулярно	$w=0,5\%$	Технологічний	Газоаналізатор
ТП 6.2 Очищення від сірководню	Концентрація сірководню Тиск	регулярно	$p=1,2 \text{ МПа}$ $C<0,010,05\%$	Технологічний Хімічний	манометр газоаналізатор

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

ТП 6.3 Накопичен ня біогазу в газгольдер і	Тиск		0,5 МПа	Технологіч ний	Манометр
ПВ 8.2 Сушіння шламу	Температу ра Вологість	Кожної операції	t=80°C w=12%	Технологіч ний	Термопара
ПВ 8.3 Гранулюв ання	Відповідні сть параметра м технологіч ного режиму	Кожної операції		Технологіч ний	

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

## РОЗДІЛ 4. ВИБІР І ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ

### 4.1 Основні технологічні розрахунки

Для розрахунку основних параметрів біогазової установки необхідно знайти значення основних показників: добового та річного виходів субстрату, його вологість, вміст сухих речовин, вихід біогазу та інших. Розрахунки наведено за методикою [18].

Добовий вихід гною:

$$Q_{г,д} = (M_E + K * M_E) * \frac{n}{1000} = (55 + 2 * 55) * \frac{300}{1000} = 49,5 \text{ т},$$

де  $M_E$  – добова маса екскрементів від однієї голови ВРХ (55 кг);

$K$  – коефіцієнт, що залежить від системи видалення відходів ( $K=2$ );

$n$  – кількість голів ВРХ.

$$Q_c = Q_{г,д} + Q_k = 49,5 + 4,2 = 53,7 \text{ т},$$

де  $Q_k$  – кількість силосу кукурудзи, що використовується як ко-субстрат для зброджування.

$$Q_{с \text{ річний}} = 53,7 * 365 = 19600,5 \text{ т}$$

***Розрахунок впливу якісних параметрів гнойової біомаси на вихід біогазу***

Вологість гною:

$$W_{г} = \frac{(W_E + 100Z)}{1 + Z} = \frac{86 + 100 * 2,5}{1 + 2,5} = 96 \%,$$

де  $Z$  – показник, який враховує кількість води, що потрапляє в систему гноєвидалення ( $Z=2,5$ )

Вологість субстрату:

$$W_c = \frac{W_{г} * Q_{г,д} + W_k * Q_k}{Q_c} = \frac{96 * 49,5 + 19,6 * 4,2}{53,7} = 90 \%,$$

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис		РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЛАДНАННЯ	Арк.	Аркушів
Розроб.		Веремчук Т.В.					
Перевір.		Щурська К.О.				42	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.		Щурська К.О.					

де  $W_k$  – вологість кукурудзи.

Вміст сухої речовини ( $P_{a.c.p.}$ ) та органічної речовини ( $O_p$ ) за рік визначається розрахунковим методом:

$$P_{a.c.p.} = Q_{c \text{ річний}} * \frac{100 - W_c}{100} = 19600,5 * \frac{100 - 90}{100} = 1960,1 \text{ т};$$

$$O_p = P_{a.c.p.} * 0,8 = 1568 \text{ т};$$

### ***Визначення основних параметрів систем анаеробного зброджування***

Добова продуктивність реактора, або його пропускну здатність щодо вихідного гною визначається за кількістю вихідної гнойової біомаси:

$$G_{\text{доб}} = Q_{\text{річн}} / (t_{\text{річн}} - t_z) = Q_{\text{річн}} / 365 - 30 = Q_{\text{річн}} / 335$$

$$G_{\text{доб}} = \frac{19600,5}{335} = 58,5 \frac{\text{т}}{\text{добу}};$$

Добовий обсяг завантаження метантенка дорівнює добовому виходу з ферми гною вологістю 88-92% і розраховується за формулою:

$$Q_{\text{доб}} = \frac{W_c * Q_c}{W_{\Gamma}^1 * q_{\Gamma}},$$

$$Q_{\text{доб}} = 90 * \frac{53,7}{90 * 1,06} = 50,4 \text{ т};$$

$W_{\Gamma}^1$  приймаємо за 90%, тоді  $q_{\Gamma} = 1,06 \text{ т}$ .

Об'єм бродильної камери визначається за формулою:

$$V_k = Q_{\text{доб}} * \frac{100}{pq}$$

$p=7\%$  (для мезофільного процесу), коефіцієнт завантаження  $q$  приймаємо 0,8.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			43

$$V_k = 50,4 * \frac{100}{7 * 0,8} = 900 \text{ м}^3;$$

Отже, за типовим проектом обираємо 2 метантенка об'ємом резервуару 1000 м<sup>3</sup> (табл.4.1) [19].

Річний вихід біогазу розраховується за формулами з врахуванням вмісту в гнойовій біомасі органічної речовини:

$$V_r = P_{a.c.p.} \cdot K \cdot \rho,$$

$$V_r = 21\,211,5 * 1000 * 0,3 * 0,4 = 235206 \text{ м}^3$$

де  $V_r$  – річний вихід біогазу, м<sup>3</sup>;

$P_{a.c.p.}$  – добова або річна кількість сухої речовини, кг;

$\rho$  – вихід біогазу з 1 кг органічної речовини (приймаємо 0,4 м<sup>3</sup>);

$K$  – коефіцієнт зброджування органічної речовини (0,3).

Таблиця 4.1. Розміри типових метантенків

Номер типового проекту	Корисний об'єм, м <sup>3</sup>	Діаметр, м	Висота, м		
			Верхньо го конуса	Циліндричної частини	Нижнього конусу
ТП 902-2- 227	1000	12,5	1,9	6,5	2,15

#### ***Визначення виходу залишкової продукції***

$$M_{\text{ш річн}} = Q_{\text{с річн}} \cdot \frac{W_q - W_c}{W_q - W_{\text{ш}}},$$

де  $M_{\text{ш річн}}$  – річна маса шламу, т;

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			44

$Q_{с\text{ річн}}$  – річний вихід субстрату, т;

$W_q$  – вологість рідкої фази, % (99%)

$W_c$  – вологість субстрату, що завантажується, %

$W_{ш}$  – вологість шламу після розділення, приймаємо 50%.

$$M_{ш\text{ річн}} = 19600,5 \cdot \frac{99 - 90}{99 - 50} = 3600,1 \text{ т.}$$

Відносний вихід шламу:

$$M_{ш\text{ річн відн}} = \frac{M_{ш\text{ річн}} \cdot 100}{Q_{с\text{ річн}}} = 3600,1 \cdot \frac{100}{19600,5} = 18,4\%$$

Річний вихід рідкої фракції визначається за формулою:

$$M_{q\text{ річн}} = Q_{с\text{ річн}} \cdot \frac{W_c - W_{ш}}{W_q - W_{ш}} = 19600,5 \cdot \frac{90 - 50}{99 - 50} = 16000,4 \text{ т}$$

де  $M_{q\text{ річн}}$  – річна маса рідкої фракції, т.

Відносна кількість рідкої фракції:

$$M_{q\text{ річн відн}} = \frac{M_{q\text{ річн}} \cdot 100}{Q_{r\text{ річн}}} = 81,6 \%$$

### ***Визначення виходу товарного біогазу***

Товарний біогаз – це частка біогазу від загальної кількості біогазу, який отримують в процесі анаеробного зброджування, з якого можна одержати теплову або електроенергію, або замінити біогазом природні носії енергії (природний газ, нафту, дизпаливо, бензин тощо). Частина отриманого біогазу використовується для підігрівання біомаси, що зброджується.

Вихід товарного біогазу залежить від кількості біогазу, який використовується для підігрівання зброджуваної біомаси та витрат теплової енергії при анаеробному бродінні, які у свою чергу залежать від природно-кліматичних умов розміщення господарства, режиму роботи складу і конструкційних особливостей БГУ [25].

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			45

Кількість теплової енергії, необхідної для підігрівання біомаси:

$$\varepsilon_{\text{бгу}} = C \cdot Q_{\text{г річн}} \cdot \Delta t,$$

де  $\varepsilon_{\text{бгу}}$  – теплова енергія, необхідна для підігріву гною до температури бродіння, МДж;

$Q_{\text{г річн}}$  – річна кількість гною, яка виходить з ферми;

$\Delta t$  – різниця температури зброджування і температури гною ( $t_{\text{збр}} - t_{\text{гною}}$ ), °C.

$C$  – питома теплоємність рідкого гною (4,19 кДж/кг·град).

Примітка:  $t_{\text{збр}}$  залежить від режиму роботи БГУ, а  $t$  вихідного гною складає у теплий період року (245 діб) в середньому +20°C; в холодний – +10°C (120 діб).

Цей показник визначається спочатку окремо для теплового і холодного періоду року за формулами:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{бгу тепл період}} &= C \cdot (Q_{\text{с річн}} \cdot 245) \cdot \Delta t = 4,19 \cdot (53,7 \cdot 245) \cdot 25 \\ &= 675009 \text{ МДж};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{бгу хол період}} &= C \cdot (Q_{\text{с річн}} \cdot 120) \cdot \Delta t = 4,19 \cdot (53,7 \cdot 245) \cdot 15 \\ &= 826886 \text{ МДж};\end{aligned}$$

$$\varepsilon_{\text{бгу річний}} = \varepsilon_{\text{бгу тепл період}} + \varepsilon_{\text{бгу хол період}} = 1501895 \text{ МДж.}$$

Кількість біогазу, необхідного для підігріву біомаси, визначається за формулою:

$$Q_{\text{бгу}} = \frac{\varepsilon_{\text{бгу}}}{q} = \frac{1501895}{22} = 68268 \text{ м}^3$$

де  $Q_{\text{бг}}$  – кількість необхідного для підігріву біомаси біогазу, м<sup>3</sup>;

$q$  – чиста теплотворна здатність біогазу ( $q = 22 \text{ МДж/м}^3$ ).

Частка біогазу, необхідного для підігріву гною, визначається за формулою:

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			46



$$\eta_n = \frac{Q_{\text{бгу}}}{V_{\text{Г річн}}} = \frac{68268}{254538} = 0,27$$

де  $Q_{\text{бг}}$  – необхідна кількість біогазу для підігріву біомаси,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{Г річн}}$  – річний вихід біогазу,  $\text{м}^3$ .

Максимальний теоретичний коефіцієнт виходу товарного біогазу визначається таким чином:

$$K_{\text{тб}} = 1 - \eta_n = 1 - 0,27 = 0,73$$

де  $K_{\text{тб}}$  – коефіцієнт товарного біогазу.

Вихід товарного біогазу:

$$V_{\text{тг}} = V_{\text{Г річн}} * K_{\text{тб}} = 254538 * 0,73 = 186270 \text{ м}^3$$

Коефіцієнту ефективності БГУ, який характеризує енергетичний і техніко-технологічний рівень визначається за формулою:

$$K_{\text{еф}} = \frac{V_{\text{Г річн}} * q + \varepsilon_{\text{бгу}}}{Q_{\text{бгу}}} = \frac{254538 * 22 + 1501895}{68268} = 82\%.$$

Як видно з розрахунків, параметри сировини та обрані умови зброджування дають досить високий коефіцієнт ефективності біогазової установки – 82%. Для процесу анаеробного зброджування обрано два метантенки за типовим проектом ТП 902-2-227 з корисним об'ємом  $1000\text{м}^3$ .

#### 4.2 Підігрів сировини в метантенку

Найпоширенішою схемою є система опалення і водонагрівального котла, який працює на тепловій енергії, отриманій в результаті спалювання біогазу на КГУ. В якості нагрівальних елементів застосовують теплообмінники у вигляді змієвиков, секцій радіаторів або паралельно зварених труб, де теплоносієм служить гаряча вода температурою біля  $60^\circ\text{C}$ . Вища температура підвищує ризик налипання завислих частинок на поверхні теплообмінника. Теплообмінники рекомендується розташовувати в зоні дії перемішуючого

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			47

пристрою, що допомагає уникнути осадженню твердих частинок на його зовнішній поверхні [20].

При монтуванні системи опалення важливо забезпечити умови, необхідні для природної циркуляції рідини в системі. На трубопроводах опалення повинні бути встановлені вентилі для випуску повітря з верхніх точок, а на системі підігріву устаткування – розширювальний бачок для компенсації зміни об’єму води. Для контролю температури всередині реактора встановлений термометр чи термостат.

Для підтримання необхідної температури в метантенку найчастіше використовується система труб з теплоносієм, що вмонтована у стіну або розташована перед стіною резервуару.

#### 4.3 Перемішування сировини в метантенку

Перемішування сировини в реакторі підвищує ефективність роботи БГУ, запобігає осадженню твердих частинок на теплообмінники і дно реактора, перешкоджає утворенню кірки на поверхні. В безперервному режимі роботи метантенку необхідне безперервне перемішування. Перемішування в основному може бути зведено до наступних способів: механічними мішалками, біогазом (який пропускається через товщину сировини) і перекачуванням сировини з верхньої зони в нижню (рис.4.1). Робочими органами механічних мішалок є шнеки, лопаті і планки. Вони можуть приводитися в дію вручну, від електродвигунів або від повітряного двигуна [21].

Механічні мішалки з ручним приводом найпростіші у виготовленні та експлуатації при використанні в реакторах невеликих установок з незначним виходом біогазу. Конструктивно вони представляють собою горизонтально або вертикально встановлений вал всередині реактора паралельно центральній

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			48

осі. На валу закріплені лопаті з гвинтовою поверхнею, які забезпечують перемішування сировини та біологічних агентів. Це дозволяє збільшити швидкість процесу анаеробного зброджування і скоротити час перебування сировини в реакторі. Перемішування шляхом пропускання біогазу менш ефективне, ніж механічне [22].

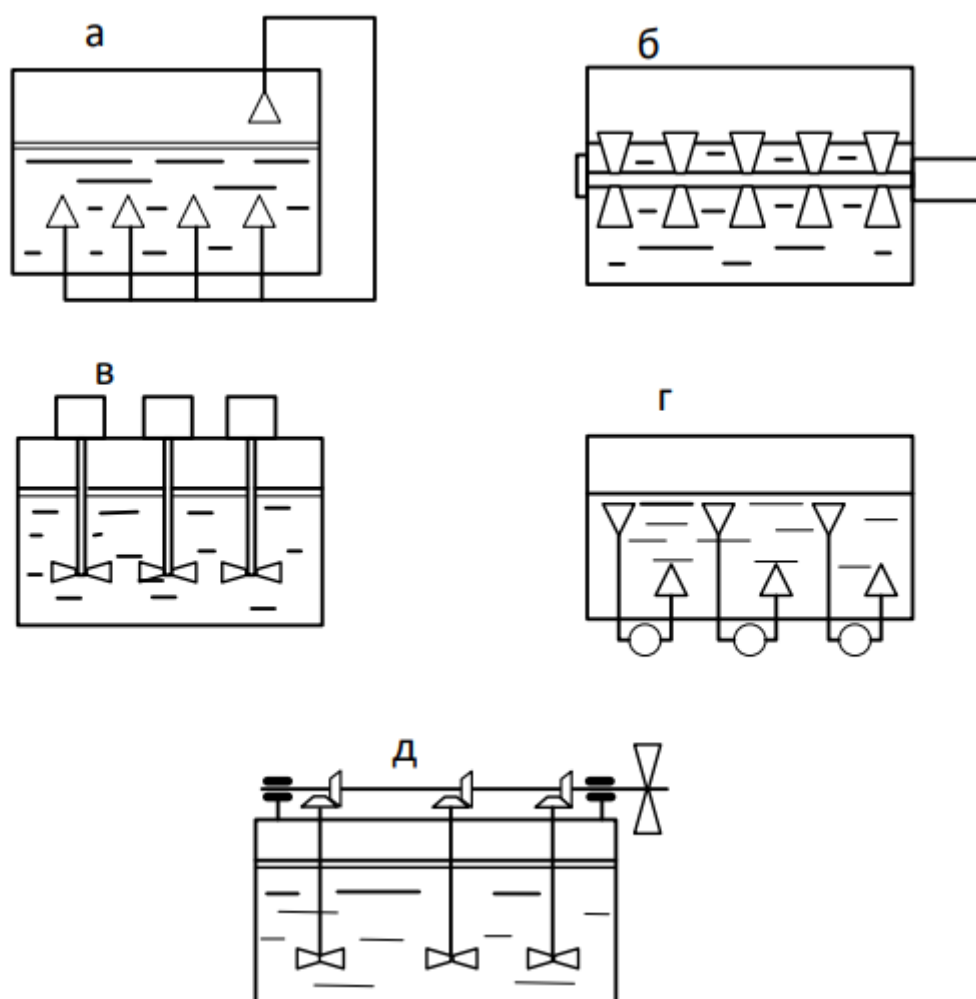


Рис. 4.1 Способи перемішування сировини в метантенках: а) перемішування біогазом; б) лопатеве механічне перемішування; в) перемішування механічними мішалками з електродвигунами; г) перемішування за допомогою насоса; д) перемішування механічними мішалками від вітряного двигуна.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			49

Для метантенків циліндричної форми, в яких співвідношення діаметр : висота складає більше, ніж 2: 1 і об'єм близько 1 000 м<sup>3</sup>, все частіше використовують гвинтові занурені мішалки.

Електродвигун, що знаходиться в водонепроникною оболонці потужністю 2,5-25 кВт (залежно від розміру резервуара) рухає пропелер. Пропелер в залежності від свого розташування виробляє потік в горизонтальному або вертикальному напрямку. Зручним для уникнення утворення кірок на поверхні субстрату і осаду є можливість змінювати висоту розташування мішалки. Для мішалки, яка буде повертатися в сторони, трос направляється роликами. Крім того на рухомий опорі необхідно встановити посудину, яка наповнюється водою і ущільнює рухливу обсадну трубку і нерухомий вал.

Слід також враховувати, що занурені мотори можна використовувати при температурному режимі до 40 ° С, оскільки в іншому випадку вони не будуть в достатній мірі охолоджуватися. Мішалки з зануреними двигунами з прямим електроприводом працюють з високим числом обертів до 1500 об / хв. Можна встановлювати дві мішалки, які монтуються в протилежних кінцях споруди. Крім того з метою запобігання утворенню осаду можна встановити додатково ще третю мішалку. Діаметр ротора дво- або трилопатевих мішалок залежить переважно від числа обертів і лежить в межах 300-700 мм. Крім гвинтових мішалок з електричним приводом, застосовуються також пропелерні мішалки з тяговим приводом.

Для того щоб перемішувати за допомогою гвинтових мішалок субстрати з високим вмістом СР, використовуються дволопастні мішалки з діаметром ротора 1000-1600 мм, які працюють з числом оборотів 0-160 або 0-100 об / хв. Для приводу встановлюють гідравлічні агрегати з двигуном на 15 кВт [23].

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			50

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ, ОХОРОНА ПРАЦІ

Біогазові установки в багатьох випадках можуть бути джерелом небезпеки:

1) Хоч біогаз ( $\rho = 1,2 \text{ кг / м}^3$ ) і легше ніж повітря, але схильний до розшарування. При цьому вуглекислий газ збирається ( $\rho = 1,85 \text{ кг / м}^3$ ) внизу, в той час як більш легкий метан ( $\rho = 0,72 \text{ кг / м}^3$ ) піднімається вгору. Витік біогазу (як неочищеного, так і очищеного) може призвести до отруєння або задухи

2) Біогаз в суміші з повітрям може вибухнути, якщо відсоток вмісту в загальній суміші становить більше 6% і з'являється джерело підпалу з температурою більш  $700^\circ\text{C}$ .

3) Небезпека, викликана роботою/несправністю обертових частин установки, електричних приладів, трубопроводів і резервуарів під тиском [24].

Затверджені правила техніки безпеки для біогазових установок дають великий і детальний опис техніки безпеки при поводженні з окремими будівельними елементами, комплектації технічних приміщень по спалюванню газу і розміщення генератора, прийому виконаних робіт, експлуатації та відключення установки, організації зон підвищеної небезпеки (вибухонебезпечних ділянок), запобігання нещасних випадків та ін.

Випробування та запуск біогазової установки повинні відповідати ДСТУ 7588:2014 «Сільськогосподарська техніка. Установки біогазові. Методи випробування». До цього додаються вимоги з охорони праці, оскільки на БГУ працює окремий персонал. Необхідно надати документ з вибухонебезпечними зонами, за яким можна було б визначити [25]:

- Де можуть утворюватися вибухонебезпечні газові суміші і наскільки велика їх небезпека;

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис				
Розроб.		Веремчук Т.В.			РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ, ОХОРОНА ПРАЦІ	Арк.	Аркушів
Перевір.		Щурська К.О.				51	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.		Щурська К.О.					

- Які заходи здійснюються для зменшення цієї небезпеки;
- Схематичне зображення вибухонебезпечних зон.

Захисні дистанції орієнтуються на безпеку під час вибуху. Зона 0 належить до такої, в якій постійно існує небезпека вибуху (при нормальному робочому режимі її зазвичай не виникає на біогазових установках). Зона 1 охоплює територію, на якій час від часу виникає вибухонебезпечне середовище з різних газів (напр. навколо газових факелів). Зона 2 охоплює територію на якій може утворитися вибухонебезпечне середовище з газів [14].

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання встановлені згідно з ГОСТ 12.2.003-74, в якому визначені вимоги до основних елементів конструкції, органів управління і засобів захисту, які входять в конструкцію виробничого обладнання будь-якого виду і призначення.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися засобами індивідуального захисту – спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх слід захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості [26].

Обов'язкова установка захисного заземлення. При виконанні робіт зі зняттям напруги встановлювати заземлення на струмовідні частини необхідно безпосередньо після перевірки відсутності напруги.

Заземлені струмовідні частини мають бути відокремлені від струмовідних частин, що перебувають під напругою, видимим розривом (вимкненими вимикачами, роз'єднувачами, відокремлювачами або

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

вимикачами навантаження, знятими запобіжниками, демонтованими шинами або проводами). Безпосередньо на робочому місці заземлення додатково встановлюється в тих випадках, коли ці частини можуть опинитися під наведеною напругою (потенціалом), яка може викликати ураження струмом, або коли на них може бути подана напруга понад 42 В змінного і 110 В постійного струму від стороннього джерела [24].

При роботі на біогазовій установці необхідно дотримуватися вимог гігієни праці і виробничої санітарії, контролювати дотримання норм мікроклімату, освітлення, шумів та вібрацій.

Параметри мікроклімату, що нормуються: температура ( $t$ , °C) і відносна вологість повітря ( $W$ , %), швидкість його переміщення (м/с), потужність теплових випромінювань ( $Вт/м^2$ ). Допустимі відхилення наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Вимоги до мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Допустима температура на робочих місцях, °C		Допустима відносна вологість на постійних та непостійних робочих місцях	Допустима швидкість руху кисню на постійних та непостійних робочих місцях, м/с
		Постійних	Непостійних		
Холодний	Середньої важкості ПБ	15-21	13-23	75	не більш 0,4
Теплий	Середньої важкості ПБ	16-27	15-29	70 при 25 °C	0,2-0,5

Джерелами виробничого шуму та вібрацій можуть бути двигуни, вентилятори, насоси. Захист від шуму повинен досягатись розробкою шумобезпечної техніки застосуванням засобів індивідуального захисту, а також будівельно-акустичними методами.

Основні технічні заходи по зменшенню шуму та вібрацій [26]:

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			53

- правильність проектування масивних фундаментів під віброактивне обладнання (дробарки та ін.) з урахуванням динамічних навантажень;
- застосування віброзатримуючих гнучких вставок на вихлопі з нагнітачів;
- застосування вібропоглинаючого резинового покриття;
- звукоізоляція шумних машин кожухами.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



## ВИСНОВКИ

В дипломному проекті було охарактеризовано гній ВРХ і силос кукурудзи як сировину для виробництва біогазу за такими показниками як вологість, вміст сухої речовини, співвідношення C:N, вміст азоту та фосфору. Використання силосу кукурудзи як ко-субстрату для зброджування гною ВРХ збільшує відношення C:N, що попереджає інгібування процесу аміаком. Для оптимальних показників сировини, що йде на виробництво біогазу, було визначено співвідношення гною ВРХ і силосу кукурудзи 9:1. В результаті аналізу технологій для сумісного зброджування було обрано систему вологого типу, в якій використано реактор з механічним перемішуванням. Обрано безпереврний режим роботи метантенку при мезофільних умовах зброджування.

Оптимальні умови біохімічних процесів, що відбуваються при зброджуванні, і життєдіяльності біологічних агентів – гідролітичних, ацидогенних, ацетогенних і метаногенних бактерій є важливими показниками, що визначають параметри процесу виробництва біогазу.

Обрана технологічна схема містить такі основні етапи: подрібнення, гомогенізація, нагрівання субстрату, анаеробне зброджування у метантенку, очищення біогазу від залишкової вологи та сірководню, отримання електроенергії та тепла на когенераційній установці, отримання гранульованого біодобрива зі збродженої біомаси. Розроблена апаратурна схема відповідає обраній технології. Розраховано основні параметри біогазової установки, спроектовано метантенк об'ємом 1000 м<sup>3</sup>, що відповідає обраній технології та визначеним показникам.

Визначено основні вимоги охорони праці та техніки безпеки при виробництві біогазу.

					<i>ЕКБ.БЕ6103.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Веремчук Т.В.</i>			ВИСНОВКИ	<i>Арк.</i>	<i>Акресий</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Щурська К.О.</i>					
						55	
						<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ</i>	
<i>Затверд.</i>		<i>Щурська К.О.</i>					

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Г.Г.Гелетука, П.П.Кучерук, Ю. Б.Матвеев, Т.В.Ходаковская. Перспективы производства биогаза в Украине. "Возобновляемая энергетика", №3, 2011, с.73-77.
2. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В., Гелетука Г.Г., Морозова Є.В., Перерва Є.С. Дослідження ефективності сумісного зброджування гною свиней та силосу кукурудзи // Механізація, екологізація і конвертація біосировини в тваринництві. – 2011. – 8, №2. – С. 45-53.
3. Chu X., Wu G., Wang J., Hu Z.H. Dry Co-digestion of sewage sludge and rice straw under mesophilic and thermophilic anaerobic conditions // Environmental Science and Pollution Research. – 2015. – V. 22. – № 24. – С. 43–53.
4. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Ходаківська Т.В., Грабовський М.Б. Перспективи виробництва біогазу з сумішей гнойових відходів тваринництва та рослинної сировини в Україні // Пром. теплотехника. – 2013. – 35, №1. – С. 107- 113.
5. Zareei S. Modeling and optimization of biogas production from cow manure and maize straw using an adaptive neuro-fuzzy inference system [Електронний ресурс] / S. Zareei, J. Khodaei // Renewable Energy. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: doi:10.1016/j.renene.2017.07.050.
6. Vandevivere P, De Baere L, Verstraete W. Types of anaerobic digester for the organic wastes. London: IWA Publishing; 2003. С. 111–140.
7. Angelonidi E, Smith SR. A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. Water Environ J.– 2015. –№29. – С.549–557.
8. Rapport J, Zhang R, Jenkins BM, Williams RB. Current anaerobic digestion technologies used for treatment of organic wastes. California Environmental Protection Agency. California: California Integrated Waste Management Board; 2008.
9. Trzcinski AP, David CS. Microbial biomethane from solid wastes: Principles and biotechnological processes. USA: CRC Press; 2017. p. 77–151.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис				
Розроб.		Веремчук Т.В.			ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Арк.	Аркушів
Перевір.		Щурська К.О.				56	
						КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФБТ	
Затверд.		Щурська К.О.					

10. Поліщук В.М. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу / В.М. Поліщук, М.М. Лободко, О.В. Сидорчук, О.В. 68 Зм. Арк. № докум. Підпис Арк. ЕКБ.БЕ5104 ДП Поліщук//Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування: Зб. наук. праць. - Київ, 2013. - № 185. Ч. 3 - С. 180-191.
11. Dinh Pham Van. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends [Електронний ресурс] / Dinh Pham Van // Environmental Engineering Research. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eer.2018.334>.
12. Biogasgewinnung und –nutzung. Handreichung. – Institut fur Energetik und Umwelt gGmbH. 3., uberarbeitete Auflage, Gulzow, 2006. – 232 p.
13. Скляр В. Спорные и бесспорные преимущества когенерации / Владимир Скляр. // СиБ. – 2014. – №2.
14. Барбара Эдер. Биогазовые установки. Практическое пособие / Барбара Эдер, Хайнц Шульц., 2011. – 268 с.
15. Никитина А. Биотехнологические и микробиологические аспекты термофильной анаэробной переработки коммунальных органических отходов при высокой нагрузке по субстрату : дис. канд. / Никитина Анна – Москва, 2018. – 168 с.
16. Голуб Н. Переробка біомаси / Наталія Голуб. – Київ, 2013. – 204 с.
17. Технология использования биомассы в биогазовых установках // Амон Т., Амон Б., Дубровин В. и др. // Зб. наук. праць НАУ. – К.: – 2003. – № 60. –С.18.
18. Таргоня В. Визначення обсягів вторинної сировини та розрахунок можливого виходу біогазу на тваринницьких фермах та комплексах / В. Таргоня, В. Оверченко, Б. Щербак – Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2013.
19. Типовой проект 902-2-227 Метантенки железобетонные.
20. Hamed M.El-Mashad. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure / Hamed M.El-Mashad. // Bioresource Technology. – 2004. – №95. – С. 191–201.
21. Buta Singh. Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review [Електронний ресурс] / Buta Singh,

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

- Zoltán Szamosi, Zoltán Siménfalvi // Critical Reviews in Biotechnology.  
– 2020. – Режим доступу до ресурсу: DOI:  
10.1080/07388551.2020.1731413.
22. Alastair James Ward. Mixing system improves biogas output [Електронний ресурс] / Alastair James Ward // Processing. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: [processingmagazine.com/mixing-blending-size-reduction/article/15586689/mixing-system-improves-biogas-output](http://processingmagazine.com/mixing-blending-size-reduction/article/15586689/mixing-system-improves-biogas-output)
  23. Голуб Г. БЮГАЗ [Електронний ресурс] / Г. Голуб, В. Дубровін // ЮНІДО. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.reee.org.ua/download/trainings/%D0%A2%D0%9C\\_7.pdf](http://www.reee.org.ua/download/trainings/%D0%A2%D0%9C_7.pdf).
  24. Любін М. Основи запуску та експлуатації біогазових установок для фермерських господарств / М. Любін, О. Цуркан, Д. Токарчук. // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2012. – №10. – С. 69–76.
  25. ДСТУ 7588:2014 «Сільськогосподарська техніка. Установки біогазові. Методи випробування»
  26. Веденев А.Г., Маслов А.Н. Строительство биогазовых установок. Краткое руководство. – Б.: «Евро», 2006. – 28 с.

					ЕКБ.БЕ6103.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			